

Розробка технології усунення недоліків кольоровідтворення цифрових фотографічних зображень

Б. М. Ковальський, М. М. Дубневич, Т. С. Голубник, Н. С. Писанчин,
Б. М. Гавриш

Складність інтегрування систем управління кольором у робочий потік отримання цифрових півтонових зображень, через постійно змінні за потужністю та спектральним складом випромінювання умови експонування, призводить до появи на фото недоліків кольоровідтворення. Широкий спектр коректурних засобів графічних редакторів не дозволяють повною мірою усунути відхилення у кольоровідтворенні фотозображень через закладені у них недосконалі технічні підходи до реалізації самого коректурного ефекту.

Ускладнюється процес виправлення недоліків кольоровідтворення відсутністю методів об'єктивного кількісного оцінювання якісних характеристик цифрового кольорового півтонового зображення.

Розроблена методика кількісного оцінювання колірних характеристик цифрових зображень шляхом перерахунку актинічностей у значення ефективних густин забезпечує оптимальний та всебічний аналіз точності відтворення кольору. Методика полягає у представленні кольороподільних характеристик у вигляді залежності ефективних густин фотозображення від еквівалентно-сірих густин реєстрованого об'єкта. Стає можливим чисельно оцінити наявні на цифровому кольоровому фотозображенні недоліки відтворення кольорів.

Розроблена методика оцінювання стала основою для реалізації нового методу виправлення недоліків відтворення кольору при допомозі компенсативних коригуючих зображень, що забезпечують усунення недоліку по недостатній кількості кольору. Коректурний ефект забезпечується фізичним змістом компенсативних зображень, що містять ефективні густини по виділених кольорах, яких бракує на цифрових фотографічних зображеннях через неізоактинічність ізохромних кольорів.

Нова технологія виправлення кольоровідтворення реалізується у розробленому спеціалізованому програмному забезпеченні Image Redactor. Ефективність описаного методу доведено на підставі аналізу зображень, опрацьованих у створеному програмному продукті, за описаною у статті методикою графічного представлення кольороподільних характеристик. Матриці кольороподілу свідчать про суттєве підвищення корисних контрастів по виділених кольорах порівняно із аналогічними характеристиками кольоровідтворення на зображеннях до опрацювання. Це передбачає можливість застосування розробленого методу виправлення недоліків кольоровідтворення у цифровому робочому потоці опрацювання фотографічних зображень

Ключові слова: цифрова фотографія, світлочутливість, масив Баєра, оцінювання кольоровідтворення, питома ефективна густина

1. Вступ

Цифрова фотографія сьогодні впевнено зайняла позиції єдиного засобу отримання півтонового фотозображення у сучасному робочому потоці реєстрування оптичної інформації. Але переважно отримані фотозображення потребують значного доопрацювання якісних характеристик у графічних редакторах та інших програмних продуктах. Додатково ускладнює процес постфотографічного опрацювання відсутність стандартної процедури об'єктивного оцінювання якості цифрового фотозображення, а перелік та гранично допустимі значення показників якості не регламентуються жодним нормативним документом.

Особливо важко досягнути на цифрових фотографічних зображеннях задовільного кольоровідтворення через технічні обмеження застосування систем управління кольором у цифровому фотографічному процесі. Засоби редагування кольору у відомих графічних редакторах базуються на принципах тональної коректури без урахування походження кольороподільних недоліків. Перелічені причини призводять до отримання півтонового зображення з незадовільними якісними характеристиками.

Таким чином, існує необхідність у технології виправлення недоліків кольоровідтворення, яка дозволить отримати кращий коректурний ефект, ніж існуючі сьогодні технологічні рішення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для отримання повноколірного зображення у адитивному колірному просторі необхідно якомога точніше зафіксувати три його одноколірних компоненти: червоне, зелене та синє часткове зображення. Точність фіксування цих масивів інформації є одним із визначальних факторів впливу на колірні характеристики цифрового фотозображення (кольоровідтворення).

Ланцюжок трансформування інформації про колір від реального об'єкта (об'єкта зйомки) до його цифрового образу (цифрового кольорового півтонового фотозображення) наступний. На об'єкт зйомки з певними спектральними характеристиками (здатність відбивати видимі зони спектру описується функцією $\rho_0(\lambda)$) потрапляє випромінювання від джерела світла з розподілом енергії по зонах спектру $E_1(\lambda)$, що залежить від колірної температури. Відбитий і промодульований об'єктом зйомки світловий потік потрапляє на приймач світлової енергії (матрицю КМОН чи ПЗЗ елементів) крізь оптичну систему об'єктива з пропускнуою здатністю $\tau_0(\lambda)$.

Для сепарування поліхроматичного світлового потоку на три монохроматичних компоненти у переважній більшості моделей сучасної цифрової фототехніки (крім декількох моделей, оснащених багат шаровою матрицею Foveon, яка однак має обмежене застосування) використовуються масиви світлофільтрів (масив Баєра) з наступною математичною інтерполяцією даних про колір у кожному пікселі зображення (алгоритми дебаєризації).

Коефіцієнт пропускання трьох сепаруючих світлофільтрів ($\tau_{c_1}(\lambda)$, $\tau_{c_2}(\lambda)$, $\tau_{c_3}(\lambda)$), встановлених перед світлочутливими приймачами, визначає кількість світлової енергії, що потрапляє на приймач.

Таким чином, інтегральна реакція приймача світлової енергії визначається як (1):

$$r = f(a) = f\left(\int_0^{\infty} \rho_0(\lambda) \cdot E_1(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) d\lambda\right). \quad (1)$$

Інформаційні ресурси наводять технічні особливості реєстрування оптичного сигналу різного типу сенсорами [1]. Спектральні характеристики приладів із зарядовим зв'язком та комплементарних метал-оксидних півпровідників пояснюють необхідність застосування сепаруючих пристосувань у світлочутливих матрицях [2]. Обидва типи півпровідників не володіють селективною світлочутливістю до окремих зон видимого спектру. На рис. 1 наведено залежність квантової ефективності фотореакції світлочутливих приймачів (різних типів матриць, сформованих з приладів з зарядовим зв'язком) від довжини хвилі випромінювання. Як демонструє залежність на рис. 1, величина фотоефекту є практично однаковою в усьому діапазоні видимого спектру (від 400 до 700 нм).

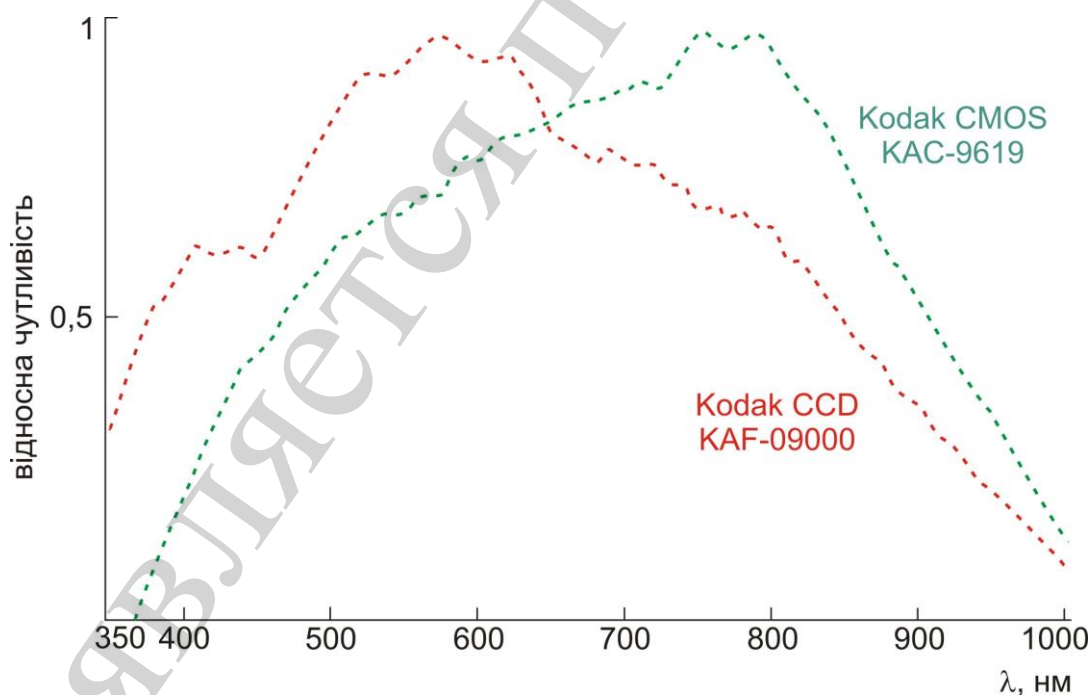
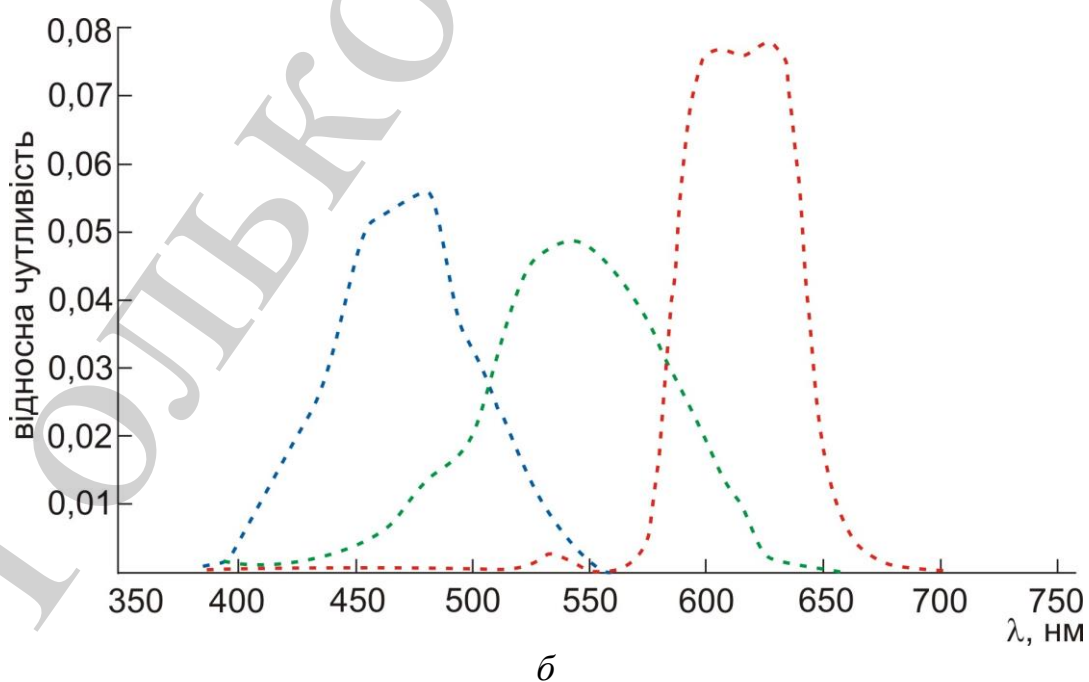
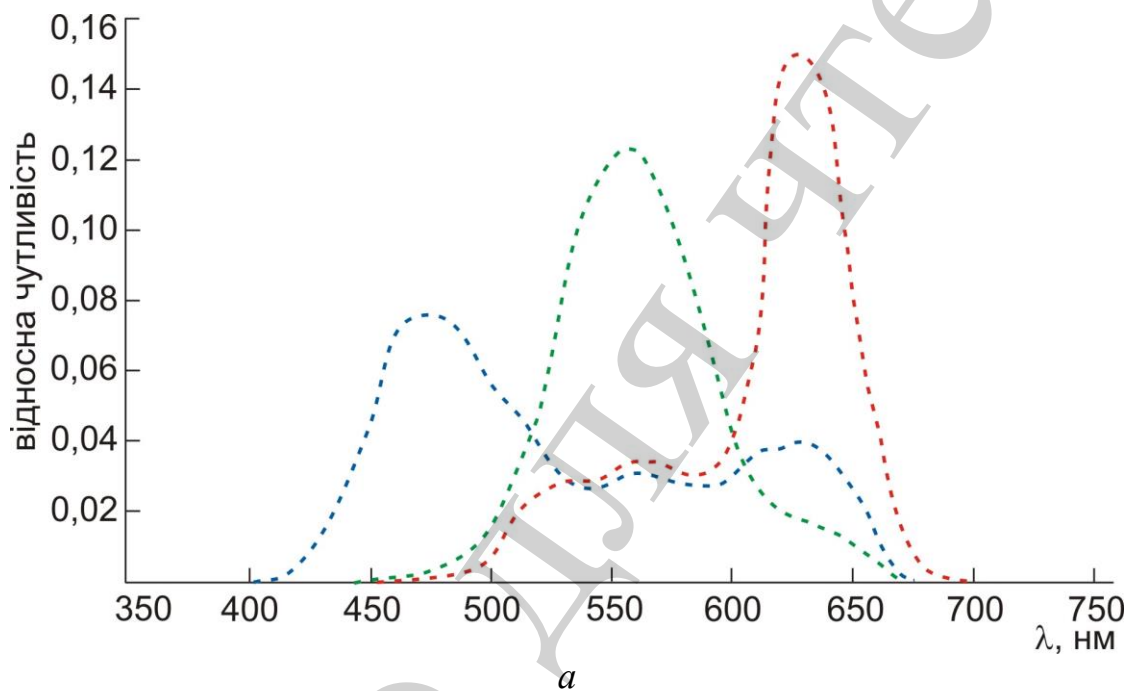


Рис. 1. Залежність світлочутливості півпровідникових фотоелементів від довжини хвилі світлового випромінювання [3]

Статус спектральної чутливості приймачів світлової енергії цифрової фототехніки трьох різних виробників за стандартним комплектом

світлофільтрів подано на рис. 2 у вигляді залежності величини відносної реакції приймача за світлофільтром від довжини хвилі [4]. Синя штрихпунктирна лінія описує чутливість приймача за синім світлофільтром, зелена – за зеленим світлофільтром, а червона – за червоним світлофільтром відповідно. Із зображених графічних залежностей видно, що усі комплекти світлофільтрів є широкозональним (зони пропускання світлофільтрів у межах комплекту перекриваються), що неминуче призведе до реєстрування світлових потоків деяких окремих довжин хвиль випромінювання за двома або навіть і трьома світлофільтрами. Це є причиною неточності фіксування інформації про колір та наступної неточності кольоровідтворення об'єкта фотографування на цифровому зображенні.



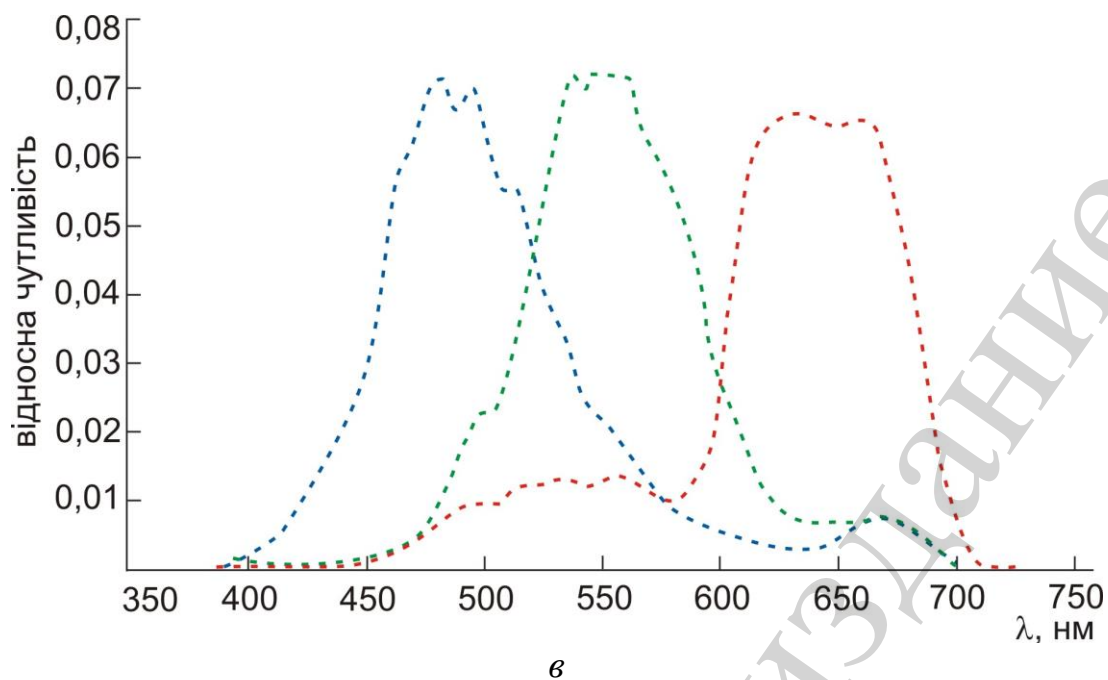


Рис. 2. Статус спектральної чутливості приймачів ПЗЗ та КМОН матриць різної конфігурації (як залежність відносної реакції приймачів від довжини хвилі світлового випромінювання) (а – повнокадрова ПЗЗ-матриця Kodac; б – ПЗЗ-матриця з буферизацією стовпця Sony; в – КМОН-матриця Agilent)

У роботах [6, 7] пропонується проводити коректуру кольороподільних недоліків у момент оцифровування масиву інформації з матриці, однак це технічно можливо лише у фототехніці, оснащений КМОН-матрицями, і додатково ускладнює робочий потік. У дослідженні [5] піднімається питання опрацювання у графічному редакторі фотозображень з метою оптимізації відтворення одного з найбільш вагомих пам'ятних кольорів (відтінків тілесного кольору). Однак усе це не вирішує проблему кольоровідтворення у комплексі.

Попередити виникнення недоліків кольоровідтворення, зумовлених недосконалістю сепаруючих середовищ, можна шляхом застосування систем управління кольором. Призначення систем управління кольором – узгодити кольорове охоплення різних колориметричних систем пристроїв введення та виведення (візуалізації) інформації, а також перетворення координат кольору із однієї кольорової системи в іншу [4].

Усі операції трансформування кольору здійснюються при допомозі ІСС-профілів, які описують на базі стандартизованих колориметричних систем можливості відтворення кольорового охоплення конкретного пристрою (зокрема, цифрової фотокамери). Для пристроїв введення зображення на кінцевий результат відображення кольору впливає ряд факторів: оптична система, характеристики сепаруючих середовищ та пристроїв (фільтри, джерела світла), програмне забезпечення.

Причини обмеженого застосування системи управління кольором у робочому потоці цифрового фотографічного процесу, як показано у роботі [8], полягають у вагомих технологічних та технічних обмеженнях:

1. При фотографуванні цифровою фототехнікою експонування проводиться кожного разу при змінних умовах освітлення: як за інтенсивністю світлового потоку, так і при різному його спектральному складі, що особливо критично для кольоровідтворення. Отриманий таким чином профіль матиме строго вузьке застосування для кадрів, знятих лише за даних конкретних умов освітлення. У кожному окремому випадку процедуру профілювання слід виконати повторно.

2. Профілювання процесу фотографування цифровою фототехнікою дуже трудомістке і має ряд особливостей:

- забезпечення однотипності умов освітлення фотографованого об'єкта (застосування однакових джерел світла зі строго контрольованою кольоровою температурою, відсутність у кадрі стороннього освітлення іншого спектрального складу, рівномірність освітлення об'єкта);

- тест-об'єкт повинен розташовуватися у кадрі таким чином, щоб уникнути рефлексів від джерел світла та розташованих поряд сторонніх об'єктів, що порушить відповідність колориметричних координат полів самого тест-об'єкта;

- освітлення тест-об'єкта повинно бути строго рівномірним по інтенсивності світлового потоку, а сама експозиція точно розрахованою, щоб уникнути недо- та переекспонування;

- при фотографуванні слід деактивувати алгоритми покращення якісних та кількісних характеристик фотографічного зображення, які по замовчуванню задіяні програмним забезпеченням фототехніки на етапі опрацювання даних зі світлочутливої матриці.

3. При побудові профілю пристроїв введення використовують тест-об'єкти з великою кількістю контрольних полів (від декількох сотень до декількох тисяч), абсолютна кількість яких прямо впливає на точність отриманого результату. Кожен тип фотоматеріалу, на якому виготовляється тест-об'єкт для калібрування, характеризується своїми унікальними особливостями у кольоровідтворенні, що пояснюється спектральними характеристиками барвників світлочутливих шарів та маскуючих шарів, що включені до складу емульсійних шарів.

Таким чином, застосувати системи управління кольором можна лише в обмеженому переліку жанрів фотографії: фешн-фотографія, фуд-зйомка, портретна зйомка та інші різновиди постановочних сцен, статичних у часі, перед фотографуванням яких вдається провести профілювання. Натомість репортаж, спортивне фото, стріт-фотографія у зв'язку з динамікою сцен та швидкою зміною подій у площині кадру не дозволяють провести попереднє фотографування тест-об'єкта для побудови ІСС-профілю. Якщо не проводити профілювання фотокамери, то на фотозображенні не уникнути появи недоліків кольоровідтворення, які у свою чергу необхідно усувати при постфотографічному опрацюванні у графічних редакторах. Проведені авторами дослідження свідчать, що за допомогою коректурних засобів найбільш популярних графічних редакторів повністю усунути недоліки кольоровідтворення, зумовлені неізоактинічністю ізохромних кольорів та застосуванням широкозональних світлофільтрів, не вдається [9].

Проведений аналіз досліджень з обраного напрямку, свідчить, що питання відтворення кольору на цифрових фотографічних зображеннях повністю не вирішено і вимагає продовження розробок.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є удосконалення технології корекції кольороподільних недоліків фотографічних зображень з урахуванням фізичного змісту причин виникнення для зменшення похибок відтворення чистих і бінарних кольорів. Це забезпечить якісне опрацювання фотографічних зображень, зокрема кольоровідтворення, а також підвищить продуктивність цифрового постфотографічного робочого потоку.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- розробити спосіб кількісного оцінювання якісних характеристик кольорових фотографічних зображень та виявлення недоліків кольоровідтворення на етапі опрацювання;
- розробити технологію усунення недоліків кольоровідтворення цифрових фотографічних зображень та реалізувати її засобами спеціально створеного програмного забезпечення, коректурні засоби якого враховують фізичний зміст виникнення кольороподільних недоліків через неізоактивність ізохромних кольорів.

4. Спосіб кількісного оцінювання якісних характеристик кольорових фотографічних зображень

Жоден із стандартів ISO (13655:2017, 12232:2006, 12233:2017 та ін, розроблені робочою групою WG 18 «Electronic still picture imaging» комітету ISO/TC 42, не пропонують методики оцінювання колірних характеристик цифрових фотографічних зображень у робочому потоці опрацювання. З огляду на необхідність існування таких засобів пропонується розроблений та апробований авторами метод ефективних густин. У цьому методі для аналізу якісних характеристик цифрових фотографічних зображень пропонується аналітичне представлення кольороподільних характеристик шляхом перерахунку активностей у значення відповідних ефективних густин [9]. Ефективна густина кольорової ділянки об'єкта зйомки визначає активність забарвлення останньої по відношенню до приймача світлової енергії з відповідним статусом чутливості. У результаті сепарування оптичної інформації світлофільтрами фотореєструючої системи зображення формується у трьох каналах. Процес кольороподілу представляється у вигляді трьох рівнянь (2):

$$D_c^{ef} = \alpha_c^j D_c^j + \alpha_c^p D_3^p + \alpha_c^r D_q^r,$$

$$D_3^{ef} = \alpha_3^j D_c^j + \alpha_3^p D_3^p + \alpha_3^r D_q^r, \quad (2)$$

$$D_q^{ef} = \alpha_q^j D_c^j + \alpha_q^p D_3^p + \alpha_q^r D_q^r,$$

де D_c^{ef} , D_3^{ef} , D_q^{ef} – ефективні густини по відношенню до світлочутливих приймачів за синім, зеленим та червоним світлофільтром; $D_c^{\text{ж}}$, $D_3^{\text{п}}$, $D_q^{\text{г}}$ – монохроматичні густини одноколірних складових (умовна кількість барвників синтезу); $\alpha_c^{\text{ж}}$, $\alpha_3^{\text{п}}$, ..., $\alpha_q^{\text{г}}$ – кутові коефіцієнти, що характеризують приріст ефективних густин на одиницю приросту кількості кольору (питомі ефективні густини).

За умови ідеального кольороподілу ефективна густина кольорової ділянки зображення по відношенню до одного з трьох світлочутливих приймачів визначається лише вмістом барвника кольору, доповняльного до кольору зони спектральної чутливості приймача. Тобто у кожному рівнянні (2) два з трьох кутових коефіцієнтів повинні прямувати до нуля. Ступінь відхилення від сформульованої умови визначає величину кольороподільних спотворень. Значення питомих ефективних густин зводимо у матриці кольороподілу (3): (α) – для чистих (одинарного накладання) кольорів, (β) – для бінарних (попарного накладання) кольорів.

$$(\alpha) = \begin{pmatrix} \alpha_c^{\text{ж}} & \alpha_3^{\text{п}} & \alpha_q^{\text{г}} \\ \alpha_3^{\text{ж}} & \alpha_3^{\text{п}} & \alpha_3^{\text{г}} \\ \alpha_q^{\text{ж}} & \alpha_q^{\text{п}} & \alpha_q^{\text{г}} \end{pmatrix}, \quad (\beta) = \begin{pmatrix} \beta_c^{\text{ж}} & \beta_3^{\text{ж}} & \beta_q^{\text{ж}} \\ \beta_3^{\text{ж}} & \beta_3^{\text{п}} & \beta_3^{\text{г}} \\ \beta_q^{\text{ж}} & \beta_q^{\text{п}} & \beta_q^{\text{г}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Матриця чистих кольорів характеризує кольоровідтворення однофарбових складових (жовтої, пурпурної, голубої) у трьох кольороподільних каналах. У рядках цієї матриці знаходяться питомі ефективні густини трьох кольорів (Ж, П, Г) по відношенню до одного із кольороподілених каналів. У стовпцях матриці знаходяться питомі ефективні густини кожного з трьох кольорів (жовтого, пурпурного, голубого) відносно кожного з трьох кольороподільних каналів: червоного, зеленого і синього. Для точнішої оцінки кольороподілу крім одинарних кольорів слід враховувати і відтворення бінарних кольорів, у зв'язку з двокомпонентним складом, оскільки при цьому вирішується завдання точного відтворення уже двох колірних складових. Тобто для досконалого аналізу якості кольороподілу необхідно скласти ще і матрицю з питомих ефективних густин бінарних кольорів.

При ідеальному кольороподілі слід забезпечити, щоб діагональні члени матриці дорівнювали одиниці, а недіагональні – нулю (4). Тобто, чим ближча матриця кольороподільних характеристик до одиничної, тим кращим є реєстрування однофарбових складових приймачами світлового сигналу.

$$(A) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (B) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

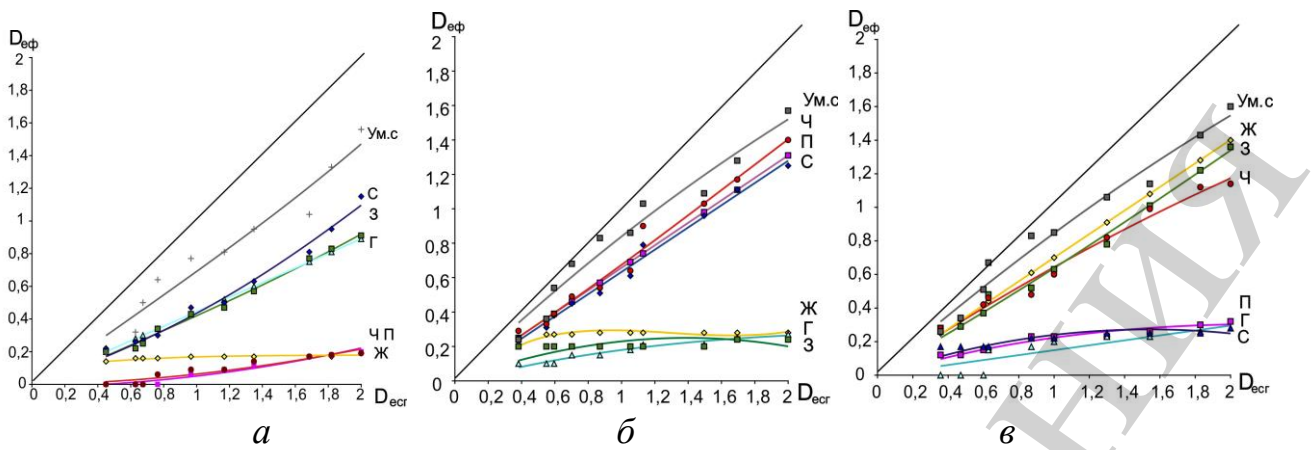
Кольорове зображення описується градаційними і кольороподільними характеристиками. Графічне представлення останніх вимагає особливо уважного підходу, оскільки вибір координат впливає на характер кривих кольоровідтворення. Об'єктивно відображають кольороподільні характеристики фотографічного зображення графічні залежності величини ефективних густин від актинічних еквівалентних-сірому густин [10].

Графічний метод визначення кольороподільних характеристик дозволяє оцінити якість кольороподілу, проведеного зокрема засобами сепарування кольору у цифровій фототехніці. Лінії ефективних густин характеризують функціональну залежність між величиною отриманого ефекту на кожному із трьох кольороподільних приймачів, вираженого ефективною густиною, і величиною вхідного параметра, що характеризує кількість жовтого, пурпурного чи голубого барвника або фарби оригіналу.

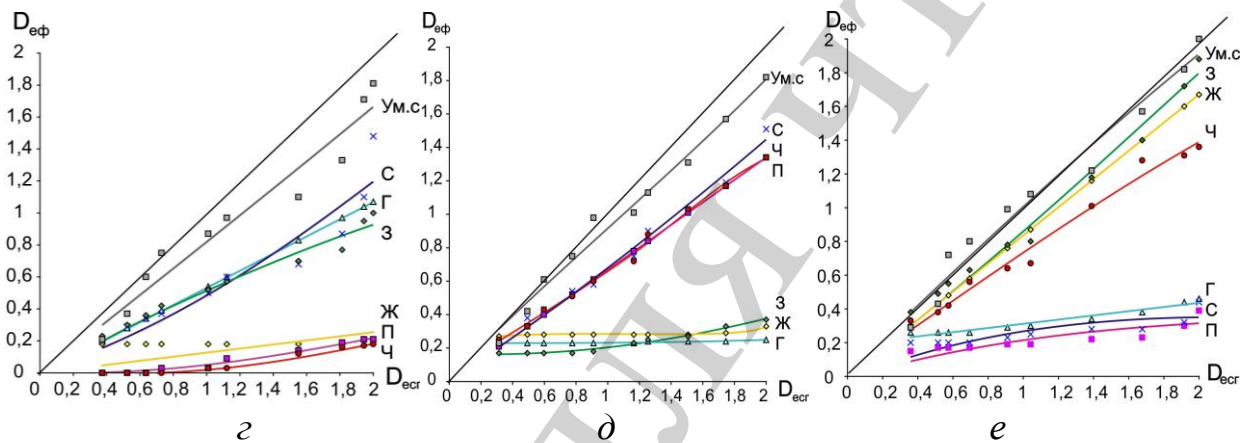
Для формування матриць, кольороподілу, що описують якісні характеристики кольороподілених зображень, слід побудувати три графічні залежності кольороподільних характеристик. По осях абсцис у такому графічному представленні відкладають величини, які характеризують кількісні характеристики кожної з однофарбових складових, а по осях ординат – ефективні густини кольорових шкал.

Для якісної та кількісної оцінки кольороподілу доречно представити кольороподільні характеристики у вигляді графічних залежностей ефективних густин $D_{\text{еф}}$ полів кольорових шкал фотографічного зображення від величини його еквівалентних-сірому густин $D_{\text{есг}}$.

Згідно викладеної методики подано кольороподільні характеристики фотографічних зображень, отриманих двома моделями цифрової фототехніки, оснащених різними типами світлочутливих матриць: ПЗЗ- та КМОП-матрицею (рис. 3). Для сепарування одноколірних складових повноколірного зображення в обох моделях фотокамер застосовано масив світлофільтрів Байєра. Лінії ефективних щільностей на кожній координатній площині відображають вміст одного з барвників субтрактивного синтезу (голубого, пурпурного, жовтого). Для об'єктивного аналізу кольоровідтворення визначається вміст перелічених барвників по наступних кольорах фотографічного зображення: жовтому (Ж), пурпурному (П), голубому (Г), синьому (С), зеленому (З), червоному (Ч) та умовно сірому (Ум.с.). На побудованих графіках кольороподільних характеристик визначаються тангенси кута нахилу ліній ефективних густин до осі абсцис (питомі ефективні густини). Останні є кількісними характеристиками кольороподілу, оскільки відображають приріст ефективних густин в залежності від приросту кількості кольору. Значення питомих ефективних густин зводяться у матриці кольороподілу чистих та бінарних кольорів (3).



1) кольороподільні характеристики фотозображення, отриманого фотокамерою EOS 77D (Canon) (КМОП-матриця)



2) кольороподільні характеристики фотозображення, отриманого фотокамерою PowerShot SX430 IS (Canon) (ПЗЗ-матриця)

Рис. 3. Кольороподільні характеристики цифрових фотозображень: а, г – кольороподілене зображення голубої фарби; б, д – кольороподілене зображення пурпурної фарби; в, е – кольороподілене зображення жовтої фарби

При задовільно проведеному оптичному сепаруванні світлової енергії кількість кольору по неізохромних кольорах повинна наближатися до мінімуму (в ідеалі – до нуля), а кутовий коефіцієнт апроксимованої прямої – до нуля. І навпаки – кількість кольору по ізохромних кольорах повинна наближатися до прямопропорційної залежності, а кутовий коефіцієнт – до одиниці.

Кутові коефіцієнти зведено у матриці кольороподілу чистих та бінарних кольорів ((5) – фото, отримане ПЗЗ-матрицею, (6) – фото, отримане КМОП-матрицею).

$$(\alpha) = \begin{pmatrix} 0,81 & 0,21 & 0,12 \\ 0 & 0,68 & 0 \\ 0,14 & 0,16 & 0,64 \end{pmatrix}, (\beta) = \begin{pmatrix} 0,67 & 0,84 & 0,23 \\ 0,68 & 0,14 & 0,71 \\ 0,14 & 0,59 & 0,53 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

$$(\alpha) = \begin{pmatrix} 0,65 & 0,19 & 0,16 \\ 0,12 & 0,69 & 0,19 \\ 0 & 0,12 & 0,52 \end{pmatrix}, (\beta) = \begin{pmatrix} 0,63 & 0,58 & 0,21 \\ 0,75 & 0,18 & 0,62 \\ 0,12 & 0,48 & 0,47 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Однією з найважливіших вимог до кольорових ілюстраційних оригіналів є відсутність кольороподільних спотворень або хоча б мінімальна величина. Матриці кольороподілу для фотозображень, отриманих і ПЗЗ- (5) і КМОП-матрицями (6), суттєво відрізняються від одиничних. Це свідчить про неідеальне реєстрування одноколірних складових та наявність недоліків кольоровідтворення по недостатній кількості кольору по виділених кольорах та по надлишку кольору по невиділених, тобто має місце неізоактичність ізохромних кольорів. Матриці кольороподілу фотозображень свідчать про наявність у першу чергу недоліків кольоровідтворення по недостатній кількості виділеного кольору: корисні контрасти значно нижчі від одиниці (0,47, 0,48). Надлишок барвника по невиділених кольорах на обох зображеннях є дуже незначним (шкідливі контрасти не перевищують 0,21–0,23). Такі кольороподільні характеристики можна пояснити застосуванням вузькозональних світлофільтрів у обох моделях фототехніки.

5. Розробка методу коректури недоліків кольоровідтворення цифрових фотографічних зображень окремими компенсативними коригуючими зображеннями

Наявність описаних вище кольороподільних недоліків зумовлює обов'язкове опрацювання зображень у графічних редакторах. Однак, як свідчать проведені авторами дослідження, застосування коректурних засобів найпопулярніших графічних редакторів не забезпечує повне усунення кольороподільних недоліків [8]. Тому для усунення недостатньої актичності по виділених кольорах авторами пропонується метод коректури недоліків кольоровідтворення суміщенням кожного окремого кольороподіленого зображення з окремими компенсативним зображенням. Фізичний зміст компенсативних зображень полягає у наявності густини по виділених кольорах, яких саме і бракує зображенням ((5), (6)). Кожне компенсативне зображення отримують шляхом поєднання одного позитивного кольороподіленого зображення та одного негативного кольороподіленого зображення. Для досягнення коректурного ефекту слід отримати три поєднання окремих компенсативних зображень. Їх зміст наступний: перший компенсатив – це поєднання позитива синьоканалного зображення з негативом зеленоканалного зображення; другий – позитива зеленоканалного зображення з негативом червоноканалного зображення; третій – позитива

червоноканального зображення з негативом зеленоканального зображення. На наступному етапі відбувається зведення компенсативів з відповідними коригованими кольороподіленими зображеннями.

Аналітично описати представлений метод можна наступними математичними залежностями (7):

$$\begin{aligned}D_r &= a'_r D_c + a_r^n (D_c - D_3), \\D_n &= a'_n D_3 + a_n^r (D_3 - D_c), \\D_{ж} &= a'_{ж} D_c + a_{ж}^n (D_c - D_3),\end{aligned}\tag{7}$$

де $a'_i D_j$ – некориговані активності виділених кольорів, а вирази $a_r^n (D_c - D_3)$, $a_n^r (D_3 - D_c)$, $a_{ж}^n (D_c - D_3)$ описують характеристики компенсативного коригуючого зображення. На кожному окремому компенсативному зображенні наявна підвищена густина по виділених кольорах, а усі решта кольорові шкали, включаючи умовно-сіру, відтворені практично без контрасту. У результаті цього і виникає коректурний ефект підвищення питомої ефективної густини по виділених кольорах. Компенсативне зображення містить в основному густину по виділених кольорах, яких бракує зображенням, що підлягають коректурі, і не є позитивним чи негативним зображенням, оскільки отримують його шляхом поєднання одного з позитивних кольороподілених зображень та одного з негативних кольороподілених зображень. Схематично описаний метод виправлення недоліків кольоровідтворення окремими компенсативними коригуючими зображеннями наведено на рис. 4.

Даний метод кольорокоректури проходить у два етапи:

1. Отримання окремих компенсативних зображень:

а) позитив синьоканального зображення поєднаний з негативом зеленоканального зображення;

б) позитив зеленоканального зображення у поєднанні з негативом червоноканального зображення;

в) позитив червоноканального зображення у поєднанні з негативом зелено- чи синьоканального зображення).

2. Поєднання компенсативів з відповідними коригованими кольороподіленими зображеннями.

Розглянемо розроблену методику коректури кольороподільних недоліків окремими компенсативними коригуючими зображеннями покроково:

1. Дублювати некориговане (вихідне) зображення.

2. Отриману копію розбити на три окремих одноканальних (однофарбових) зображення, а зеленоканальне зображення (для пурпурної фарби) знову дублювати, оскільки планується двічі використати негатив зеленоканального зображення: для компенсативів синьо- та червоноканальних зображень (для жовтої та голубої фарб відповідно).

3. Створення компенсативного зображення для синьоканального зображення:

3. 1. Для синьоканального позитивного зображення створити новий (додатковий) шар, у який скопіювати через буфер одну з копій зеленоканального зображення.

3. 2. Перетворити зеленоканальне зображення у новому шарі на негативне, виставити нормальний режим накладання, прозорість 50 % і виконати з'єднання шарів у єдине зображення. Таким чином у синьому каналі отримали компенсатив для зображення жовтої фарби.

4. Створення компенсативного зображення для зеленоканального зображення:

4. 1. Для зеленоканального позитивного зображення створити новий (додатковий) шар, у який скопіювати через буфер копію червоноканального зображення.

4. 2. Перетворити червоноканальне зображення у новому шарі у негатив, виставити нормальний режим накладання, прозорість 50 % і виконати з'єднання шарів у єдине зображення. Таким чином у зеленому каналі сформували компенсатив для зображення пурпурної фарби.

5. Створення компенсативного зображення для червоноканального зображення:

5. 1. Для червоноканального зображення (голубої фарби) створити новий шар, у який скопіювати через буфер копію зеленоканального зображення.

5. 2. Зеленоканальне зображення у новому шарі перевести у негатив, виставити нормальний режим накладання, прозорість 30 % (оскільки зображення для голубої фарби має мінімальні спотворення) і виконати з'єднання шарів у єдине зображення. Таким чином у червоному каналі сформували компенсатив для зображення голубої фарби.

6. Дублікат зеленоканального зображення, що залишився, видалити, щоб не виникло неузгодження при наступному з'єднанні каналів.

7. Канали зі сформованими компенсативами злити у єдине триканальне зображення – кольорове компенсативне коригуюче зображення.

8. Для коригованого зображення створити новий шар, у який копіювати через буфер новостворене компенсативне коригуюче зображення.

9. Виставити нормальний режим накладання, прозорість 50 % і виконати з'єднання шарів у єдине зображення.

10. Встановити нормальний контраст коригованого повноколірного зображення.

Методи покращення кольоровідтворення фотографічних зображень реалізуються за допомогою розробленої програми ImageRedactor, створеної на мові програмування C#. На рис. 5 показано приклад робочого вікна програми ImageRedactor для реалізації описаного методу коректури кольороподільних недоліків окремими компенсативними коригуючими зображеннями. У програмному продукті згідно представленої на рис. 6 схеми покроково (у діалоговому режимі) або повністю автоматично реалізується описаний метод

коректури фотографічних зображень а також ще три методи коректури кольороподільних недоліків фотозображень:

- 1) трьома окремими кольорокоригуючими зображеннями;
- 2) окремими компенсативними коригуючими зображеннями;
- 3) єдиним ахроматичним коригуючим зображенням;
- 4) єдиним кольоровим компенсативним коригуючим зображенням,

відповідно методи 1–4 в інтерфейсі програми (методи 2–4 в даній роботі не розглядались).

Інтерфейс програми побудовано таким чином, щоб користувач крім пропонуванних методів коректури міг застосовувати ще і базові засоби виправлення недоліків кольоро- та тоновідтворення фотографічних зображень (вплив на контраст, яскравість фото зображення та ін.). Вибір конкретного методу коректури здійснюється користувачем на підставі попереднього аналізу семантики фотографічного зображення (наявність пам'ятних кольорів та нейтральних відтінків). Відповідно до розробленої в даному дослідженні методики оцінювання визначаються якісні характеристики зображення і за величиною недоліків кольоровідтворення по недостатньому чи надлишковому вмісту кольорів здійснюється вибір коректурного методу.

Кольороподільні характеристики зображення (отриманого КМОН-матрицею), коригованого за розробленою методикою, подано на рис. 6. Матриці кольороподілу мають наступний вигляд (8):

$$\alpha = \begin{pmatrix} 1,0 & 0,03 & 0 \\ 0,08 & 1,0 & 0,08 \\ 0 & 0 & 1,0 \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} 0,74 & 0,91 & 0,18 \\ 1,02 & 0,08 & 0,73 \\ 0 & 0,98 & 0,92 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

По питомих густинах однофарбових зображень чистих кольорів можна зробити висновок, що за даною технологією досягається вагомий коректурний ефект. Діагональні члени матриці чистих кольорів (7) (корисні питомі густини) рівні одиниці, що відповідає умовам ідеального кольороподілу. Недіагональні члени матриці близькі до нуля. Порівняно з некоригованим зображенням, характеристики зображення, коригованого описаним методом, покращилися: практично відсутні шкідливі контрасти (від 0 до 0,08), а корисні – на рівні одиниці. Матриця питомих ефективних густин бінарних накладань кольорів, демонструє, що більшість корисних контрастів наблизилися до одиниці, а шкідливі контрасти (наслідок паразитичної актинічності) вдалося суттєво знизити. Також слід зазначити, що описаний метод коректури забезпечує оптимальний баланс по сірому: вміст голубого кольору дещо перевищує вміст решти кольорів синтезу по ахроматичних відтінках. Саме таке співвідношення колірних компонент рекомендує стандарт ISO12647-2:2013.

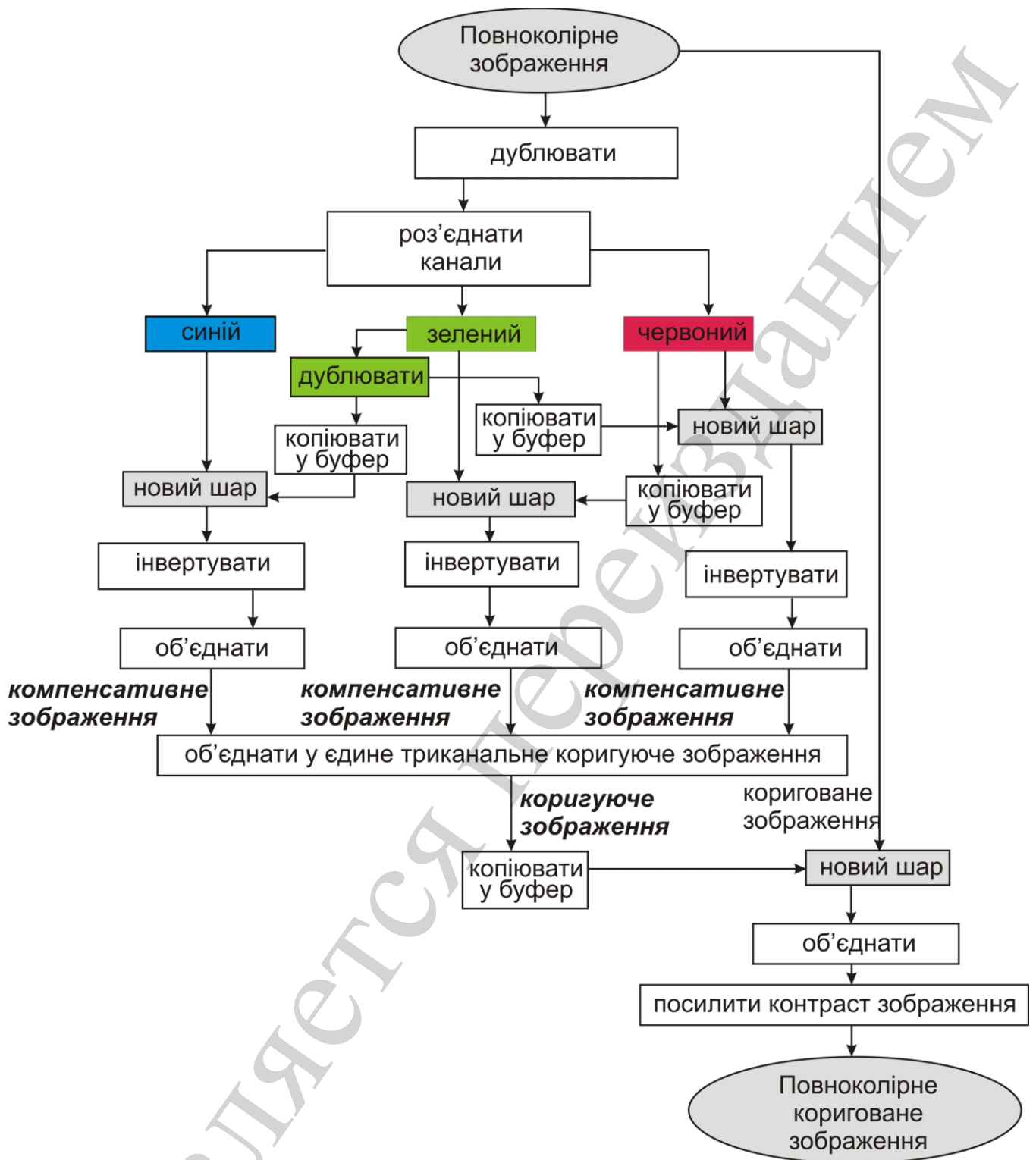


Рис. 4. Схематичне представлення методу виправлення недоліків кольоровідтворення окремими компенсативними коригуючими зображеннями

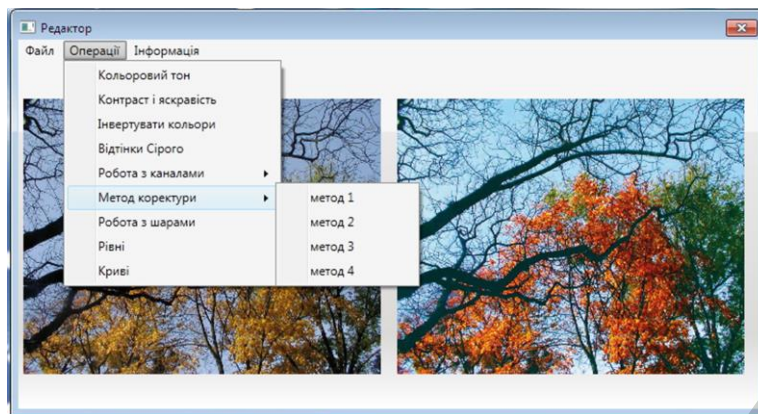


Рис. 5. Приклад робочого вікна програми ImageRedactor

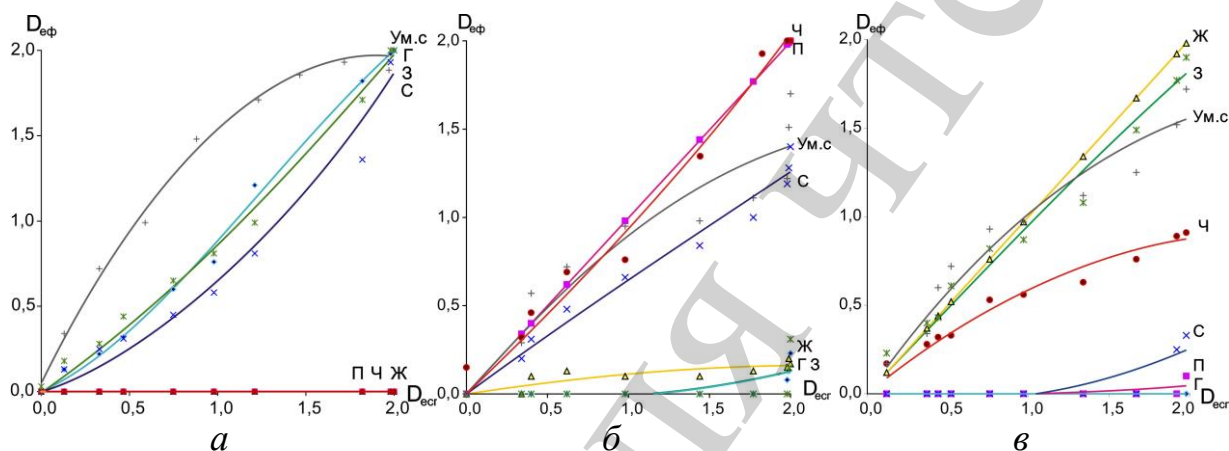


Рис. 6. Характеристика відтворення кольору, на фотозображенні, коригованому окремими компенсативними коригуючими зображеннями (а – кольороподілене зображення голубої фарби; б – кольороподілене зображення пурпурної фарби; в – кольороподілене зображення жовтої фарби)

6. Обговорення результатів виправлення недоліків кольороподілу цифрових фотографічних зображень окремими компенсативними коригуючими зображеннями

У результаті виправлення колірних характеристик розробленим методом коректури із застосуванням окремих коригуючих компенсативних зображень цифрові зображення зазнали позитивних змін. Кольороподільні характеристики коригованих зображень (рис. 8) демонструють, що шкідливі контрасти по невиділених кольорах зведені до мінімуму, а корисні контрасти – значно підвищилися у порівнянні з аналогічними кольороподіленими зображеннями до коректури (рис. 3). Матриця кольороподілу чистих кольорів коригованого фотозображення (8) демонструє практично близькі до ідеальних (4) колірні характеристики. Отриманий коректурний ефект пояснюється наявністю на компенсативному коригуючому зображенні підвищеної ефективної густини по виділених кольорах.

Досягнути такого позитивного коректурного ефекту вдалося завдяки використанню розробленого методу оцінювання якісних характеристик фотографічних зображень у цифровому вигляді. До виведення фотозображення на матеріальний носій є можливість оцінити точність сепарування та реєстрування його однофарбових складових та розрахувати бажаний коректурний ефект (майбутні характеристики коригуючих зображень).

Перевагою розробленого коректурного методу є можливість його застосування до кожного фотозображення, отриманого будь-яким класом цифрової фотографічної техніки. Технології управління кольором та профілювання фотокамер мають обмежене застосування у цифровому фотографічному потоці через технологічну складність реалізації [4, 8], а досягнути задовільного результату виправлення кольороподільних недоліків у момент реєстрування оптичної інформації чи при постфотографічному опрацюванні неможливо [5–7]. Таким чином, розроблений метод коректури кольороподільних недоліків окремими компенсативними коригуючими зображеннями має забезпечує вищий рівень коректури і має перспективи щодо успішного практичного застосування у цифровому робочому потоці опрацювання цифрової півтонової графіки.

Водночас, пропоноване технологічне рішення має певні особливості. Зокрема, на часткових зображеннях пурпурного та жовтого кольорів по бінарних накладаннях кольорів корисні контрасти ще не досягають достатнього рівня (рис. 8). Така особливість накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недолік даного дослідження. Нemoжливiсть усунути названі обмеження у рамках даного дослідження спонукає до пошуку нових вирішень особливостей кольоровідтворення цифрових фотографічних зображень, зокрема, виправлення недоліків відтворення окремих виділених кольорів.

7. Висновки

1. Розроблено метод оцінювання якісних характеристик фотографічних зображень у цифровому вигляді до виведення їх на матеріальний носій шляхом перерахунку величин актинічностей у значення ефективних густин.

2. а розробленим методом оцінювання об'єктивно проаналізовано якісні характеристики цифрових фотографічних зображень, отриманих різними технічними засобами. Виявлено наявність кольороподільних недоліків обох типів (недостатня кількість фарб по виділених кольорах та надлишок по невиділених) на усіх зображеннях, незалежно від способу їх отримання.

3. Розроблено метод виправлення (коректури) кольороподільних недоліків окремими компенсативними коригуючими зображеннями, який дозволяє отримати кольороподілені зображення, що повністю відповідають критеріям задовільного кольороподілу. Для реалізації коректурного методу створено спеціалізоване програмне забезпечення ImageRedactor, коректурні засоби якого враховують фізичний зміст походження кольороподільних недоліків, що дозволило реалізувати новий підхід до виправлення.

4. Показано, що кольороподільні характеристики фотографічних цифрових зображень, опрацьованих згідно з розробленим методом у створеному програ-

мному забезпеченні ImageRedactor, повністю відповідають сформульованим критеріям задовільного кольороподілу. Усі корисні і шкідливі контрасти входять у межі встановлених допусків як по чистих, так і бінарних кольорах. Одночасно забезпечено пропорційне відтворення усього тонального діапазону зображення, на противагу рішенням кольорокоректури у існуючих графічних редакторах.

Література

1. Mehta S., Patel A., Mehta J. CCD or CMOS Image sensor for photography // 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/iccsp.2015.7322890>
2. Measurement of normalized spectral responsivity of digital imaging devices by using a LED-based tunable uniform source / Mahmoud K., Park S., Park S.-N., Lee D.-H. // Applied Optics. 2013. Vol. 52, Issue 6. P. 1263–1271. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.52.001263>
3. Verhoeven G. J., Schmitt K. D. An attempt to push back frontiers – digital near-ultraviolet aerial archaeology // Journal of Archaeological Science. 2010. Vol. 37, Issue 4. P. 833–845. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.11.013>
4. Duran J., Buades A. A Demosaicking Algorithm with Adaptive Inter-Channel Correlation // Image Processing On Line. 2015. Vol. 5. P. 311–327. doi: <https://doi.org/10.5201/ipol.2015.145>
5. Modified color histogram equalization with variable enhancement degree for restoration of skin color / Sahani M., Rout S. K., Panigrahi A. K., Acharya A. S. // 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/iccsp.2015.7322561>
6. Color accuracy of imaging using color filters / Boher P., Leroux T., Collomb Patton V., Bignon T. // Journal of Information Display. 2012. Vol. 13, Issue 1. P. 7–16. doi: <https://doi.org/10.1080/15980316.2012.652204>
7. Color space transformations for digital photography exploiting information about the illuminant estimation process / Bianco S., Bruna A., Naccari F., Schettini R. // Journal of the Optical Society of America A. 2012. Vol. 29, Issue 3. P. 374–384. doi: <https://doi.org/10.1364/josaa.29.000374>
8. Lin M., Zhou S., Chu F. Quality Analysis in Digital Printing Based on Color Management System // International Journal of Engineering and Technology. 2009. Vol. 1, Issue 2. P. 135–138. doi: <https://doi.org/10.7763/ijet.2009.v1.24>
9. Дубневич М. Порівняння засобів виправлення недоліків кольороподілу тонових зображень у графічних редакторах // Тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції з проблем видавничо-поліграфічної галузі. Київ: УкрНДІСВД, 2014. С. 25–27.
10. Гунько С., Дубневич М. Кольороподільні недоліки цифрових півтонових зображень та технологія їх виправлення коригуючими зображеннями // Технологічні комплекси. 2014. № 2. С. 56–64.